

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

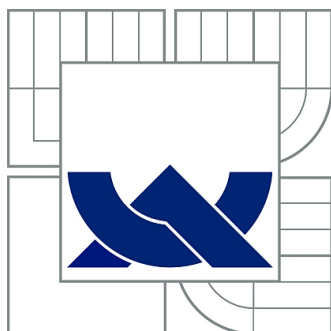
SPÍNANÝ ZDROJ S NASTAVITELNÝM PROUDOVÝM OMEZENÍM

BAKALÁRSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

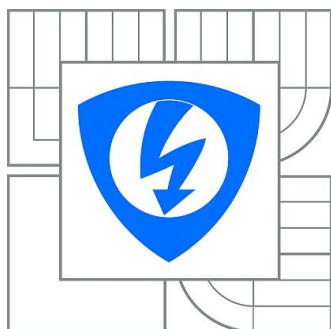
MICHAL STANĚK

Brno 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## SPÍNANÝ ZDROJ S NASTAVITELNÝM PROUDOVÝM OMEZENÍM

SWITCHED POWER SUPPLY WITH CURRENT LIMITING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

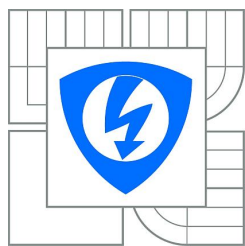
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MICHAL STANĚK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MICHAL KUBÍČEK, Ph.D.

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav radioelektroniky**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Michal Staněk  
**Ročník:** 3

**ID:** 125177  
**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

**Spínaný zdroj s nastavitelným proudovým omezením**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte koncepci spínaného laboratorního zdroje, který bude volitelně pracovat v režimu zdroje konstantního napětí nebo proudu. Nastavené i skutečné hodnoty napětí a proudu budou zobrazeny na displeji.

Navržený zdroj realizujte a ověřte jeho vlastnosti (přesnost, zvlnění výstupního napětí, zatěžovací charakteristika).

## DOPORUCENÁ LITERATURA:

- [1] KREJČÍŘÍK, A. Moderní spínané zdroje, 1. vydání. BEN - technická literatura, Praha 1999.
- [2] NOVOTNÝ, V. Napájení elektronických zařízení. Skriptum. Brno: VUT FEI v Brně, 1999.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 25.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku c.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí spínaného zdroje s plynulou regulací výstupního napětí a proudu. Pro snížení hmotnosti a rozměrů zdroje jsem se rozhodl realizovat zdroj jako spínaný. Zdroj je pro dosažení lepších parametrů složen ze dvou měničů. Vstupní izolovaný snižující měnič s transformátorem dodává pevné napětí pro regulovatelný výstupní měnič a měřicí obvody. Vstupní měnič je řešen jako blokující měnič s jedním tranzistorem. Pro jeho realizaci byl vybrán obvod typu TOPSwitch, což umožnilo významně snížit počet součástek. Výstupní regulovatelný měnič je neizolovaný snižující propustný měnič s jedním tranzistorem. Jako řídicí obvod pro druhý měnič byl vybrán typ TL594, jehož základní zapojení bylo modifikováno tak, aby zdroj splňoval parametry požadované v zadání. K zobrazení výstupních a nastavených hodnot na displeji byl použit procesor ATmega16.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Spínaný zdroj, nastavitelný zdroj, řídicí obvod, snižující měnič, proudové omezení, Atmel, ATmega16.

## ABSTRACT

This thesis is focused on design and construction of switched mode power supply with continuous regulation of output voltage and current. The Power supply is designed as a switching power supply to reduce its weight and dimensions. To reach better parameters, it consists of two separate converters. The first one is isolated step-down controller with transformer. It supplies output the second controller (adjustable) and the measuring section with stable voltage. Input converter is designed as a simple single-transistor flyback converter. The TOPSwitch circuit was selected to reduce number of components. Output bench power supply is non-isolated buck converter with single transistor. For second converter the TL594 was selected as a control circuit, which typical application was modified to fulfill requirement of the bench power supply. Processor ATmega16 was used to show both required and actual values of current and voltage on a display.

## KEYWORDS

Switching power supply, bench power supply, controll circuit, step-down controller, current limitation, Atmel, ATmega16.

STANĚK, M. *Spínaný zdroj s nastavitelným proudovým omezením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 31 s., 14 s. příloh. Semestrální práce. Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Spínaný zdroj s nastavitelným proudovým omezením jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce : Ing. Michalu Kubíčkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>1 Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2 Teorie spínaných zdrojů</b>	<b>11</b>
2.1 Spínané zdroje s jedním akumulacním prvkem .....	11
2.2 Obvody TOPSwitch – GX Family .....	12
2.3 Obvod TL594 .....	13
<b>3 Řešení zdroje</b>	<b>14</b>
3.1 Návrh předregulátoru .....	15
3.2 Návrh regulovatelného měniče .....	20
3.3 Návrh měřicí části a nastavení .....	26
3.4 Realizace zdroje .....	28
<b>4 Závěr</b>	<b>29</b>
<b>Literatura</b>	<b>30</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>31</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>32</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Zapojení měničů s jedním akumulacním prvkem .....	11
Obr. 2: Typické zapojení obvodu TOPSwitch – GX (Převzato z [3]) .....	12
Obr. 3: Blokové schéma obvodu TL594 (převzato z [4]) .....	13
Obr. 4: Blokové schéma uspořádání zdroje .....	14
Obr. 5: Vzhled transformátoru ETD39 (převzato z [5]) .....	15
Obr. 6: Vstupní obvod předregulátoru (převzato z [6]) .....	16
Obr. 7: Napájení obvodu TOP249YN (převzato z [6]) .....	16
Obr. 8: Demagnetizační obvod (převzato z [6]) .....	16
Obr. 9: Návrh transformátoru (převzato z [6]) .....	17
Obr. 10: Výstupní obvod předregulátoru (převzato z [6]) .....	17
Obr. 11: Zpětná vazba předregulátoru (převzato z [6]) .....	18
Obr. 12: Kompletní schéma předregulátoru .....	19
Obr. 13 Graf nastavení frekvence TL594 (převzato z [4]) .....	20
Obr. 14: Kompletní schéma regulovatelného měniče .....	21
Obr. 15: Průběhy napětí spínače (PSpice) .....	24
Obr. 16: Schéma výstupního filtru.....	25
Obr. 17: Blokové zapojení měřící části.....	26
Obr. 18: Kompletní schéma měřící části.....	27



# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Parametry tranzistoru IRFP9140N [7] .....	24
--	----

# 1 ÚVOD

Nastavitelné zdroje jsou nedílnou součástí každé elektronické dílny nebo laboratoře, a jejich použití má velmi široké možnosti. Z toho také vyplývají různé nároky na jejich výstupní elektrické parametry. Existují dva typy zdrojů: tzv. lineární a spínané. Lineární zdroje jsou historicky starší a jejich základem je transformátor pracující na síťovém kmitočtu. Na jejich výstupu je zařazen usměrňovač s velkou filtrační kapacitou, za nímž je nastavitelný lineární regulátor napětí. Takové zdroje jsou objemné, těžké a mají poměrně malou účinnost. Druhým typem zdrojů jsou zdroje spínané, které mají výrazně větší účinnost a při stejném výkonu menší objem a hmotnost. Na druhou stranu bývají zdrojem vysokofrekvenčního rušení, které může negativně ovlivnit jak napájené zařízení, tak distribuční síť.

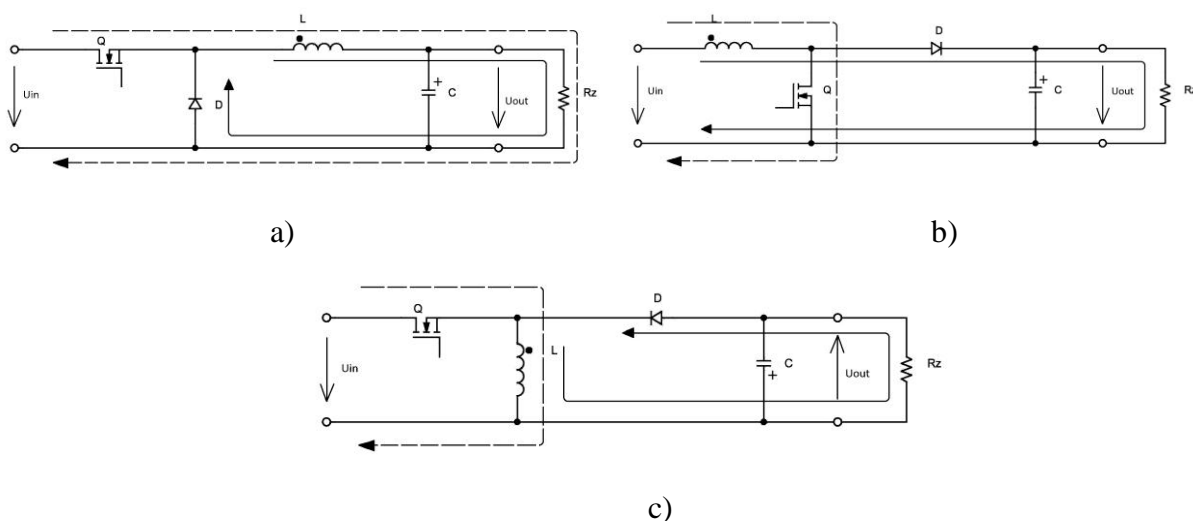
Cílem této práce je navrhnout a vyrobit nastavitelný laboratorní zdroj s proudovým omezením. Pro realizaci jsem zvolil koncepci dvojice kaskádně zapojených spínaných zdrojů. První bude dodávat pevné nízké napětí, a druhý bude toto nízké napětí přesně nastavovat na výstup dle požadavků. Tímto bude dosaženo přijatelných výstupních parametrů.

## 2 TEORIE SPÍNANÝCH ZDROJŮ

Hlavním důvodem časté konstrukce spínaných zdrojů je jejich vysoká účinnost. Běžně bývá kolem 80%, v některých případech i přes 90%. To umožňuje lepší využití omezených zdrojů (např. baterií) a menší konstrukci, než v případě použití klasických (lineárních) zdrojů. Díky klesající ceně rychlých polovodičových součástek se využívají spínané zdroje stále častěji.

### 2.1 SPÍNANÉ ZDROJE S JEDNÍM AKUMULAČNÍM PRVKEM

Existuje velké množství různých topologií spínaných zdrojů. Výkonová část všech měničů se skládá ze tří elementárních prvků: spínačů (tranzistory, diody), cívek a kondenzátorů. Pro funkci měničů jsou stanoveny na první pohled zřejmé podmínky. Indukčnost nesmí být zapojena paralelně ke vstupu nebo výstupu z důvodu jejího nasycení. Kapacita nesmí být v sérii se vstupem nebo výstupem z důvodu přenosu ss složky. Každý měnič musí obsahovat alespoň jednu indukčnost z důvodu skokových změn napětí. A poslední žádný spínač nesmí zkratovat vstup nebo výstup měniče. Z těchto důvodů vyplývá, že jsou možné pouze tři způsoby zapojení nejjednodušších měničů.



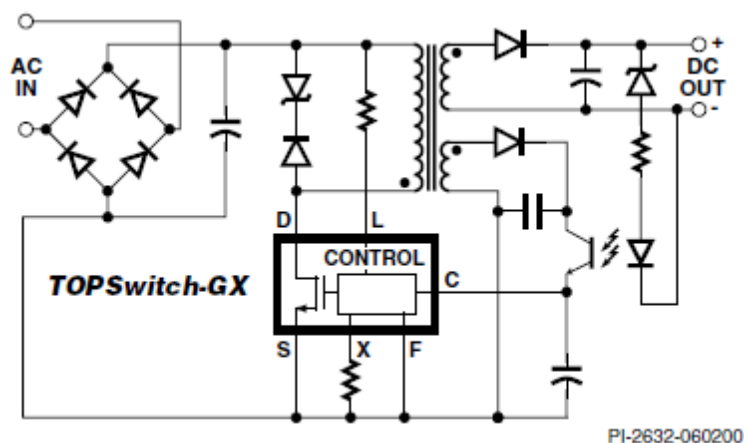
Obr. 1: Zapojení měničů s jedním akumulacním prvkem

a) snižující, b) zvyšující, c) invertující

Pro správnou funkci měničů se předpokládá provoz spojitých proudů, to znamená, že proud induktorem nikdy neklesne na nulu. Na obr. 1 jsou zakresleny směry proudu protékající tlumivkou. Čárkovaně při sepnutém spínači, a plnou čarou při rozepnutí spínači. Při jednoduchém rozboru je zřejmé, že na výstupu snižujícího měniče nemůže být napětí větší než je napětí vstupní. Naproti tomu na výstupu zvyšujícího měniče nemůže být napětí nižší než vstupní. U invertujícího měniče je možné dosáhnout na výstupu libovolně velkého napětí.

## 2.2 OBVODY TOPSWITCH – GX FAMILY

Jedná se o pulsně-šířkové modulátory s integrovaným výkonovým spínačem MOSFET. Na obr. 2 je nakresleno jejich typické zapojení – blokující měnič s transformátorem (FLYBACK) s ochrannou přepět'ovou diodou pro tranzistor.



Obr. 2: Typické zapojení obvodu TOPSwitch – GX(Převzato z [3])

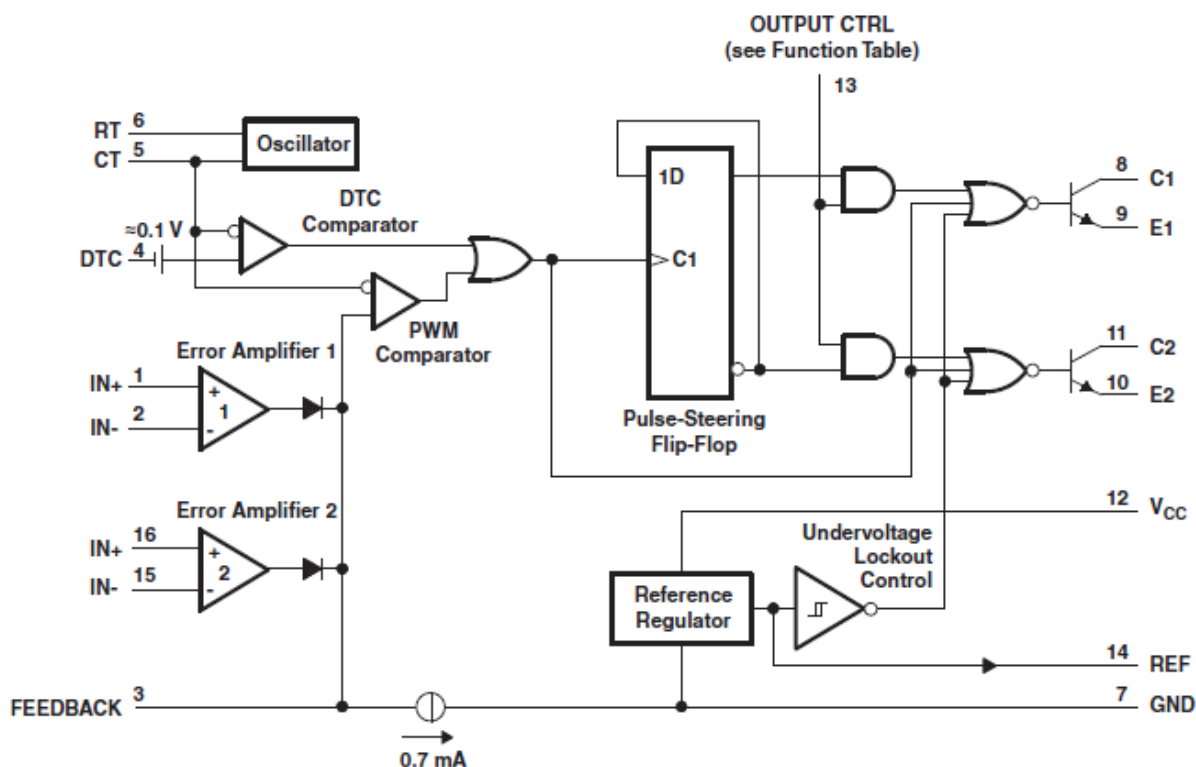
V době sepnutého spínače teče transformátorem pouze primární proud, a v době rozepnutí spínače pouze sekundární. Oba proudy jsou k sobě svázány magnetizačním tokem v jádře, který v režimu spojitých proudů nikdy neklesá k nule. Nedochází k žádné kompenzaci magnetických účinků, a proto sycení jádra je přímo úměrné výstupnímu proudu. Proud sekundárního vinutí je vyhlazen. Pro zpětnou vazbu je použito usměrněné napětí pomocného (BIAS) vinutí, jehož velikost je řízena výstupním napětím přes optočlen. Mezi hlavní výhody tohoto zapojení patří jednoduché zapojení a malé spínací ztráty použitím minimálního počtu spínacích prvků. Odpadá problém se stejnosměrným sycením jádra. Toto zapojení má ovšem i své nevýhody. Jelikož se využívá jen polovina hysterezní smyčky transformátoru, je zapotřebí použít větší jádro než při můstkovém zapojení pro přenášení stejného výkonu. Největší nevýhodou je ale velké napět'ové namáhání spínače. Celkové vypínací napětí je rovno součtu vstupního napětí a napětí přepět'ové diody. Při rozepínání většího proudu dochází k větším napět'ovým špičkám, a tím roste i potřeba zvýšit průrazné napětí spínacího prvku. Tyto zdroje jsou ekonomicky výhodné pro přenášení výkonu do 250W.

Funkce PWM kontroléru TOPSwitch – GX Family:

- Spínací frekvence 66kHz nebo 132kHz volitelně (PIN F).
- Pomalý náběh 10ms.
- Nastavitelný maximální proud na 30-100% typové hodnoty (PIN X).
- Automatické odpojení při přepětí nebo přehřátí.
- Úsporný režim při nízké zátěži

## 2.3 OBVOD TL594

Tento obvod obsahuje všechny funkce potřebné pro řídicí obvod PWM kontroléru. Navržen je primárně pro řízení zdrojů, a nabízí přizpůsobení různým aplikacím. Obsahuje dva zesilovače odchylky, nastavitelný oscilátor, nastavení "mrtvého chodu" (DTC – dead-time controll), referenční zdroj  $5V \pm 1\%$ , detekční obvod podpětí a kontroly výstupů.



Obr. 3: Blokové schéma obvodu TL594 (převzato z [4])

Funkce obvodu vychází z obr. 3. Nyní bude popsána činnost a možnosti TL594. Obvod je schopen pracovat ve dvou různých režimech PUSH-PULL (PIN13 na PIN14 Vref), anebo oběma výstupy paralelně (PIN13 na GND). Obvod je napájen napětím 7V až 41V (PIN12 a PIN7). PIN 1,2 a 16,15 jsou vstupy dvou zesilovačů výchylky, jejichž společný výstup je zapojen na PIN3. Vyšší napětí na výstupu zesilovačů zkracuje střidu spínání, a naopak. PIN 8,9 a 11,10 jsou výstupní tranzistory, které je možné zapojit jak se společným emitorem, tak i jako emitorový sledovač. PIN4 slouží k nastavení "mrtvé doby" (DTC) tj. doba z periody po kterou jsou oba tranzistory rozepnuty. Tuto dobu je možné nastavit od 5% do 100%, připojením napětí 0V až Vref na PIN4. Velmi praktické je na tento vstup připojit RC dělič, který svým nabíjením vytvoří plynulý náběh při zapnutí. Pro správnou funkci je nutné zapojit na PIN6 kondenzátor a na PIN5 rezistor kterými se nastavuje frekvence obvodu v rozmezí 1 až 300 kHz.

### 3 ŘEŠENÍ ZDROJE

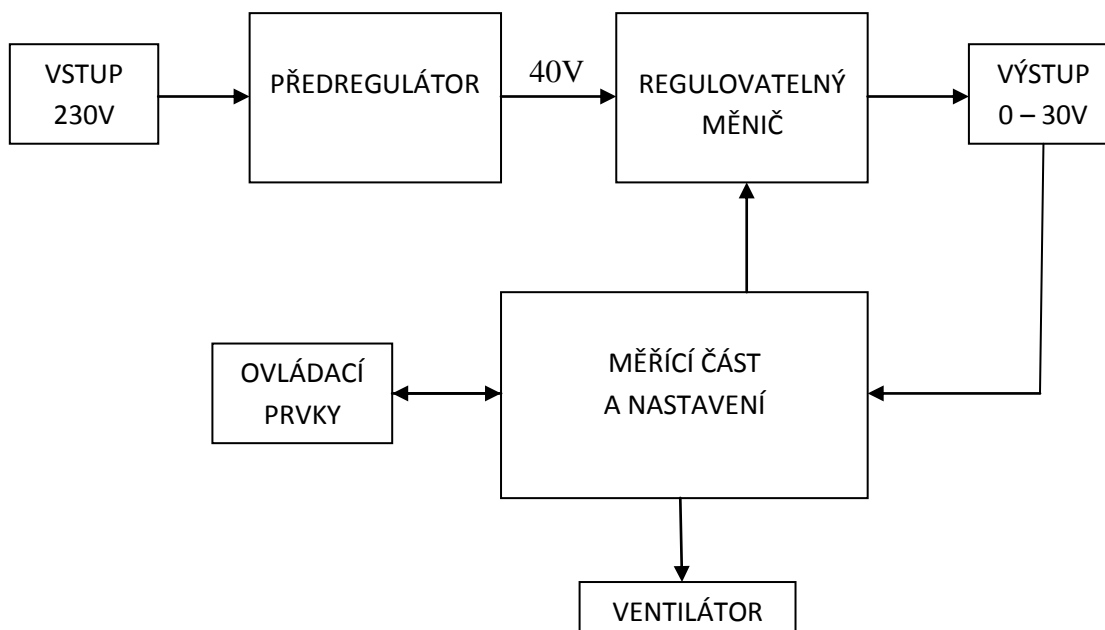
Popisovaný zdroj se skládá ze tří hlavních částí. Jednotlivé části tedy obsahují následující obvody:

**1) Předregulátor** – obsahuje pojistku, vstupní filtr a propustný měnič s transformátorem (FLYBACK) řízený obvodem TOPSwitch. Tento měnič také vytváří galvanické oddělení od vstupního napětí.

**2) Regulovatelný měnič** – obsahuje snižující měnič (BUCK) řízený integrovaným obvodem TL594.

**3) Měřicí část a nastavení** – nastavuje regulační napětí potřebné pro regulovatelný měnič a zobrazuje požadované hodnoty napětí a proudu.

Celkem jsou ve zdroji použity tři desky plošných spojů.



Obr. 4: Blokové schéma uspořádání zdroje

Na obr. 4 je nakresleno jednoduché blokové schéma zdroje. Jednotlivé bloky budou popsány v následujících kapitolách.

### 3.1 NÁVRH PŘEDREGULÁTORU

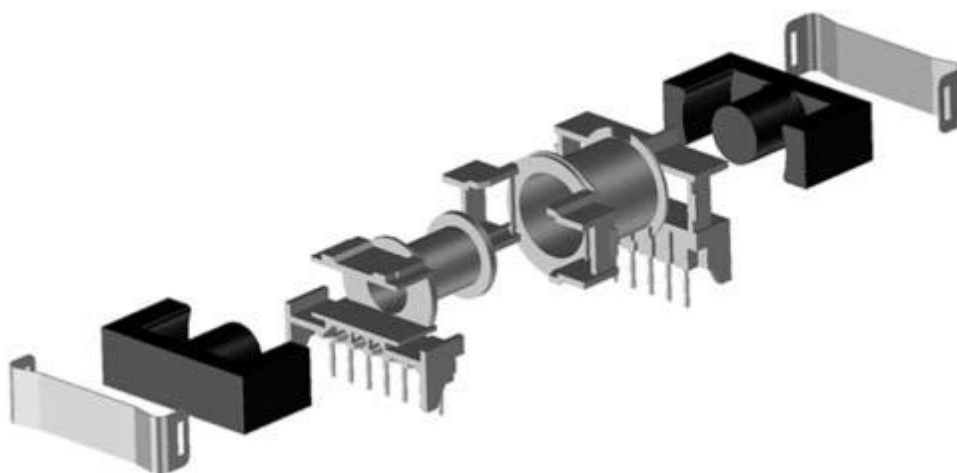
Kompletní návrh byl proveden pomocí programu PIExpert. Tento software je určen pro volné použití, a je dostupný po provedení registrace na [www: http://www.powerint.com](http://www.powerint.com). Pro vytvoření návrhu v tomto programu je nutné nejprve zvolit z několika možností:

- **Product line** - konkrétní řadu integrovaných obvodů dle funkce
- **Package** - typ pouzdra
- **Frequency** - požadovanou frekvenci spínání
- **Feedback** - druh zpětné vazby

Tyto parametry byly zvoleny podle obvodu TOP249YN, který byl zvolen na základě požadovaného výkonu. Frekvence byla zvolena 132 kHz, dále byla vybrána zpětná vazba pomocí optočlenu z výstupního napětí zdroje. Po dokončení tohoto nastavení bylo nutné nastavit hodnoty napětí a proudů:

- **Vstupní napětí** - 195V až 265V 50 Hz
- **Výstupní napětí** - 40V
- **Výstupní proud** - 5A
- **Přesnost** -  $\pm 5\%$

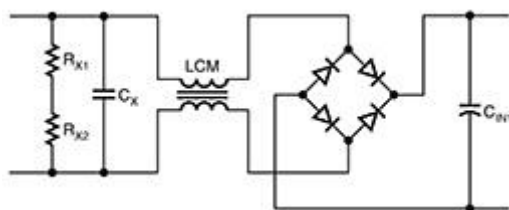
Na závěr byl zvolen typ transformátoru, a to ETD39-3F3 z důvodu jeho nízké ceny a snadné dostupnosti. Na obr. 5 je zachycen kompletní transformátor a postup složení.



Obr. 5: Vzhled transformátoru ETD39 (převzato z [5])

Po zadání všech potřebných parametrů vytvořil program PIExpert kompletní návrh zdroje včetně hodnot všech použitých součástek a včetně přesného popisu transformátoru. Vše bude postupně popsáno po jednotlivých blocích.

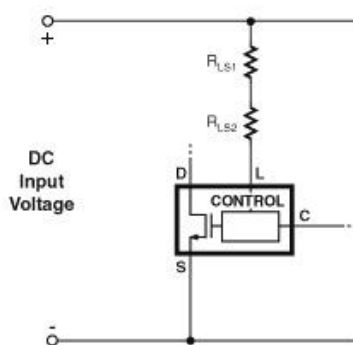
### Vstupní obvod:



Obr. 6: Vstupní obvod předregulátoru (převzato z [6])

Na obr. 6 je znázorněno zapojení vstupního obvodu. Napájecí napětí 230V je přivedeno na vstupní filtr tvořený paralelním RC článkem a odrušovací tlumivkou. Za filtrem následuje Graetzův můstek a vstupní kondenzátor.

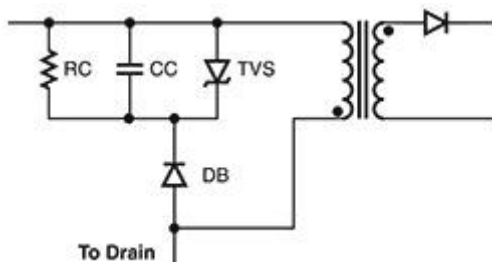
### Napájecí obvod pro IO:



Obr. 7: Napájení obvodu TOP249YN (převzato z [6])

Obvod TOP249YN má napájení přivedeno přímo z vstupního kondenzátoru přes dva sériové rezistory s vysokým odporem (viz. obr. 7).

### CLAMP obvod:

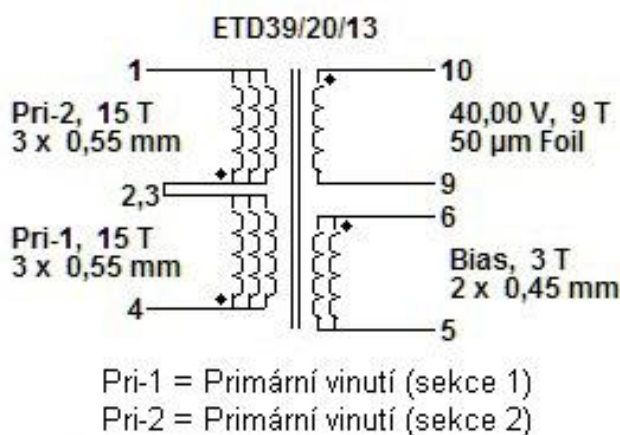


Obr. 8: Demagnetizační obvod (převzato z [6])

Na obr. 8 je nakresleno navržené zapojení obvodu, který má za úkol eliminovat napěťové špičky, které vznikají na primární straně transformátoru při rozpojení spínacího prvku. Tyto napěťové špičky otevírají diodu DB a nabíjí kondenzátor CC. Při překročení blokovacího napětí transilu TVS dochází k absorpci energie v transilu. Poté je výkon uložený v kondenzátoru spotřebován v rezistoru RC.



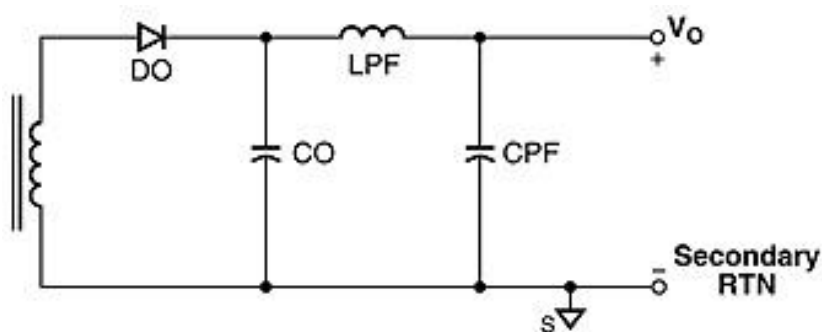
## Transformátor:



Obr. 9: Návrh transformátoru (převzato z [6])

Na obr. 9 je nakreslen návrh transformátoru. Program navrhnul i postup navinutí transformátoru. Nejdříve je třeba navinout první část primárního vinutí, poté vinutí Bias, dále sekundární vinutí a na závěr druhou část primárního vinutí. Nastavení vzduchové mezery je provedeno tak, aby při rozpojených koncích všech vinutí byla indukčnost primárního vinutí 170 μH.

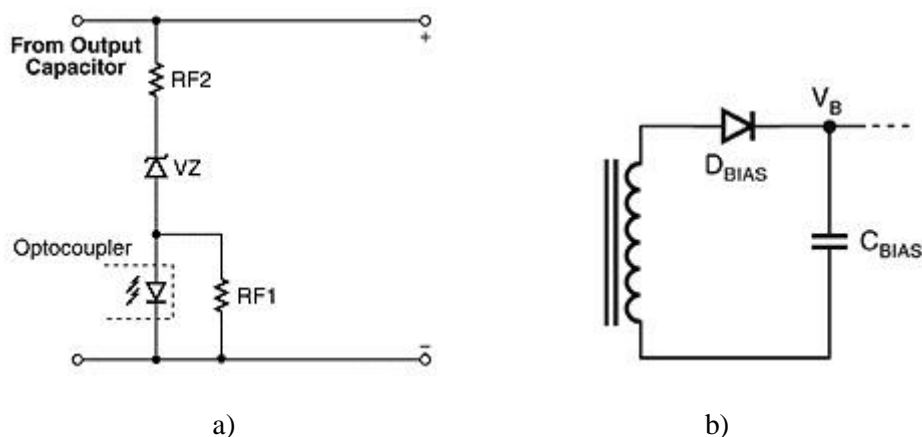
## Výstupní obvod:



Obr. 10: Výstupní obvod předregulátoru (převzato z [6])

Sekundární proud je jednocestně usměrněn diodou DO, a vyhlazen kondenzátorem CO. Dále je na obr. 10 nakreslen výstupní filtr LPF-CPF. Rezonanční kmitočet tohoto filtru by měl být řádově nižší, než je spínací frekvence měniče.

## Zpětná vazba a Bias:



Obr. 11: Zpětná vazba předregulátoru (převzato z [6])

a) Feedback

b) Bias

Na obr. 11 a) je nakresleno navržené zapojení, ve kterém je odebírané napětí z výstupu přivedeno na optočlen (zpětná vazba napětí). Na obr. 11 b) je znázorněno Bias vinutí, které slouží k vytvoření řídicího napětí obvodu. Toto napětí  $V_B$  je přivedeno na kolektor tranzistoru v optočlenu, a z emitoru je takto regulované napětí přivedeno na ovládací vstup TOP249YN (C controll).

Takto vytvořený návrh bylo už jen nutné doplnit dle návodu několika součástkami pro stabilní funkci, a to vazebním kondenzátorem zapojeným mezi primární a sekundární stranou transformátoru, a odrušovacím členem výstupní usměrňovací diody. Z důvodu nevyužití ostatních funkcí TOP249YN bylo ještě nutné připojit vstupy X a F na vývod S. Kompletní schéma je uvedeno na obr. 12.

Součásti návrhu byla i typická doporučení pro konstrukci tištěného spoje:

- co nejmenší smyčka mezi elektrodou drain, Clamp obvodem a transformátorem.
- co nejkratší cesty od pinů X a L a vedené směrem od elektrody drain.
- co nejmenší smyčka výstupního vinutí, usměrňovače a filtru.
- velká rozlitá plocha mědi pod výstupním usměrňovačem a filtrem.

Tištěný spoj byl kompletně navržen v programu EAGLE. Obrázky desky plošných spojů jsou v sekci přílohy.



## 3.2 NÁVRH REGULOVATELNÉHO MĚNIČE

Regulovatelný měnič byl navržen s obvodem TL594, který byl popsán v kapitole 2.3. Pro návrh bylo využito jednoduché zapojení snižujícího měniče v knize Napájecí Zdroje 2 [1] str. 225. Toto zapojení bylo použito jen jako inspirace, a to z několika důvodů:

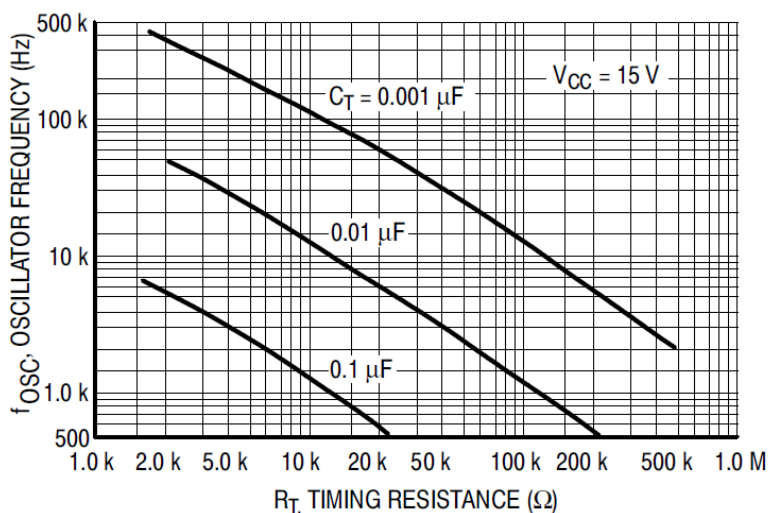
1. Poskytovalo pouze pevné výstupní napětí a proud.
2. Hodnoty vstupního i výstupního napětí neodpovídaly požadavkům.
3. Použití bipolárního tranzistoru jako spínače.
4. Chyba v obvodu nastavení maximálního proudu.

Při návrhu bylo tedy nutné vyřešit plynulou regulaci, a pomocí parametrů z katalogového listu [4] přepočítat hodnoty všech součástek. Všechny výpočty jsou uvedeny níže. Dále byl navržen spínač, který využívá MOSFET tranzistor s indukovaným kanálem typu P. O spínání výkonového tranzistoru se stará nábojová pumpa. Funkce celého spínače byla simulována v programu PSpice. Z nalezené chyby v obvodu nastavení maximálního proudu je zřejmé, že toto zapojení nebylo nikdy prakticky odzkoušeno. Z těchto důvodů nebyla žádná část převzata bez změny nebo důkladného ověření.

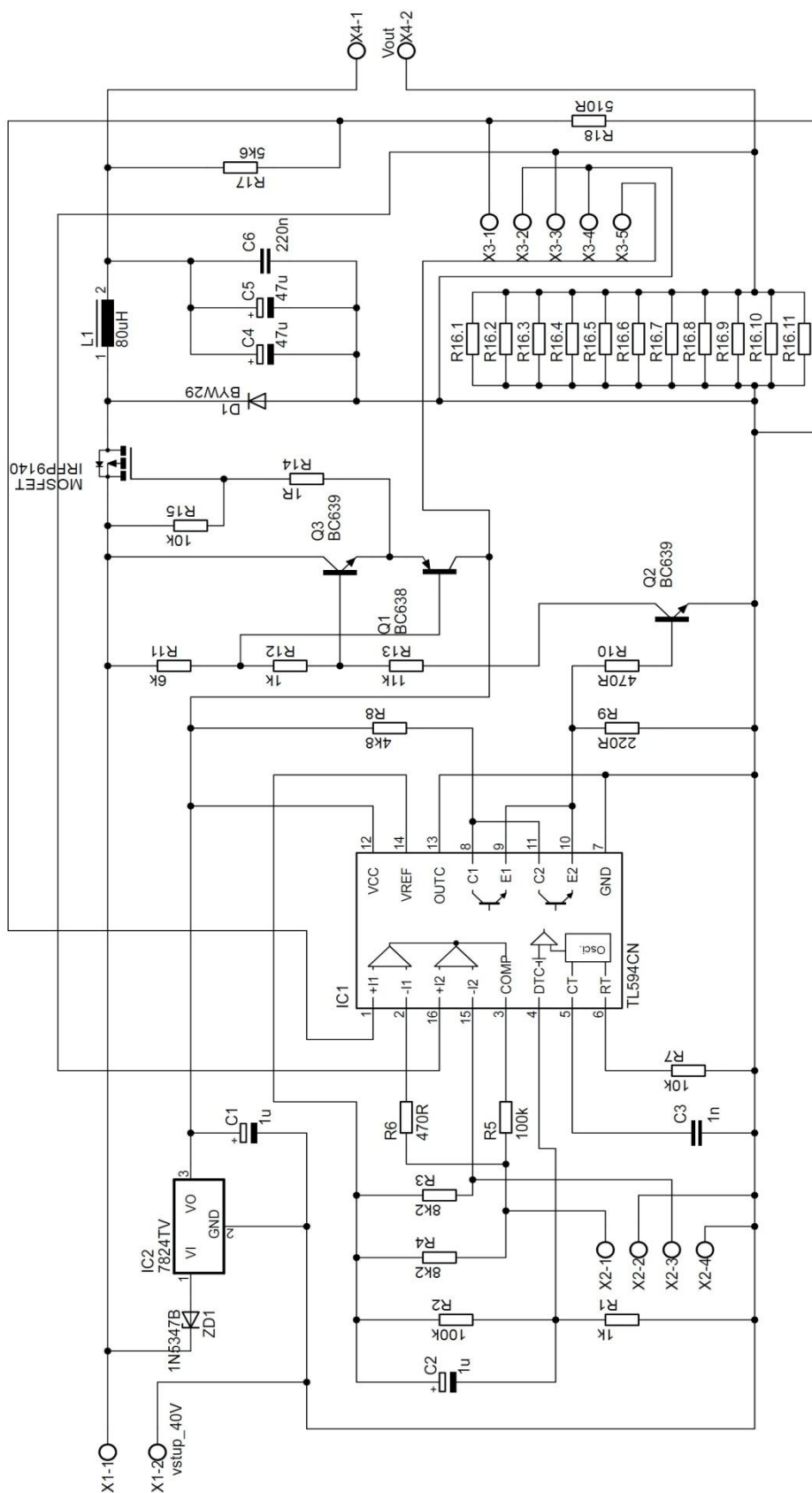
Na obr. 14 je nakresleno kompletní schéma regulovatelného měniče 0 - 30V, 0 - 5A. Při návrhu bylo postupováno následovně:

### Pracovní frekvence měniče.

Pracovní frekvence byla zvolena 100 kHz. Z grafu (viz. obr. 13) byly odečteny hodnoty  $R_T = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C_3 = 1 \text{ nF}$



Obr. 13 Graf nastavení frekvence TL594 (převzato z [4])



Obr. 14: Kompletní schéma regulovatelného měniče

### Plynulý náběh při zapnutí.

Pro plynulý náběh byla využita funkce DTC, která byla popsána v kapitole 2.3. Doba trvání plynulého náběhu byla zvolena na 100 period (1 ms), rezistor  $R1 = 1\text{ k}\Omega$ . Pro kondenzátor C2 platí

$$C2 = \frac{t}{R1} = \frac{0.001}{1000} = 1\text{ }\mu\text{F} \quad (3.1)$$

kde  $t$  je doba plynulého náběhu. Rezistor  $R2 = 100\text{ k}\Omega$  slouží pouze k vybití C2 při vypnutí.

### Nastavení napětí a proudu.

Pro řízení výstupního napětí a proudu jsou použity integrované operační zesilovače. Invertující vstupy jsou nastavovací, neinvertující slouží k připojení sledovaných výstupních hodnot. Nejprve byl navržen dělič R17, R18 kterým při 30V teče proud 5 mA, a napětí v jeho středu je 2,5V. Rezistory R3, R4 byly zvoleny 8,2 k $\Omega$ , aby každá větev odebírala z referenčního zdroje maximálně 0,6 mA (nastaveno 0V na invertujících vstupech OZ). Pro zvýšení stability, ale na úkor zhoršení zvlnění výstupního napětí je vhodné nastavit nižší zesílení OZ1. Napěťové zesílení je rovno

$$A_U = \frac{R5}{R6} = \frac{10^5}{470} = 210. \quad (3.2)$$

Výstupní napětí OZ se porovnává s pilovým napětím PWM oscilátoru, které je asi 3 V $\hat{s}$ , proto výstupní napětí OZ musí být minimálně stejné. Zvlnění výstupního napětí vypočteme

$$U_{out\ p-p} = \frac{3V}{A_U} * \frac{R17 + R18}{R18} = \frac{3}{210} * \frac{5600 + 470}{470} = 185\text{mV} \quad (3.3)$$

kde druhý zlomek je dělicí poměr z výstupu ke vstupu OZ1. Z předpokládaného maximálního zvlnění napětí je odhadnuto maximální zvlnění proudu

$$I_{out\ p-p} = \frac{U_{out\ p-p}}{R_{výst}} = \frac{0,2}{0,2} A = 1A \quad (3.4)$$

kde  $R_{výst}$  je přibližně roven odhadnutému ESR paralelní kombinace výstupních kondenzátorů C4, C5, C6. Výstupní proud při maximu je tedy roven součtu maximálního výstupního proudu a zvlnění, tedy 6A. Napětí na paralelní kombinaci rezistorů R16, která slouží jako bočník pro snímání proudu a má výsledný odpor 50 m $\Omega$ , je tedy maximálně 0,3V.

Získané hodnoty napětí, která jsou přivedena jako zpětná vazba do operačních zesilovačů (2,5V  $\sim$   $U_{OUT} = 30V$ ; 0,25V  $\sim$   $I_{OUT} = 5A$ ) jsou použity při návrhu měřicí části a nastavení, a slouží k nastavení měřidel, a řídicích napětí.

## Výstupní indukčnost a kapacita.

Pro výpočet hodnoty výstupní indukčnosti  $L1$  a výstupní kapacity  $C_{OUT}$  která se skládá z paralelní kombinace kondenzátorů  $C4$ ,  $C5$ ,  $C6$  je zapotřebí nejprve vypočítat rozsah střídý[1]

$$d_{max} = \frac{U_{OUT} + U_{D1}}{U_{IN} + U_{D1}} = \frac{30 + 1}{40 + 1} = 0,756 \quad (3.5)$$

kde  $U_{D1}$  je napětí na diodě  $D1$  v propustném směru. Z maximální střídý  $d_{max}$  získáme snadno dobu sepnutí  $T_{ON}$  následovně [1]

$$T_{ONmax} = \frac{d_{max}}{f} = \frac{0.756}{10^5} = 7,56\mu s \quad (3.6)$$

kde  $f$  je pracovní frekvence měniče. Dále doba sepnutí při střídě  $d = 0,5$  je

$$T_{ON} = \frac{d}{f} = 5\mu s \quad (3.7)$$

a předpokládané výstupní napětí při střídě  $0,5$  je  $20V$ . Z výše uvedených vztahů je možné vypočítat přibližnou maximální potřebnou hodnotu výstupní indukčnosti [1]

$$L1 \cong (U_{IN} - U_{OUT}) * \frac{T_{ON}}{I_{out\ p-p}} \cong (40 - 20) * \frac{5 * 10^{-6}}{1} \cong 100\mu H. \quad (3.8)$$

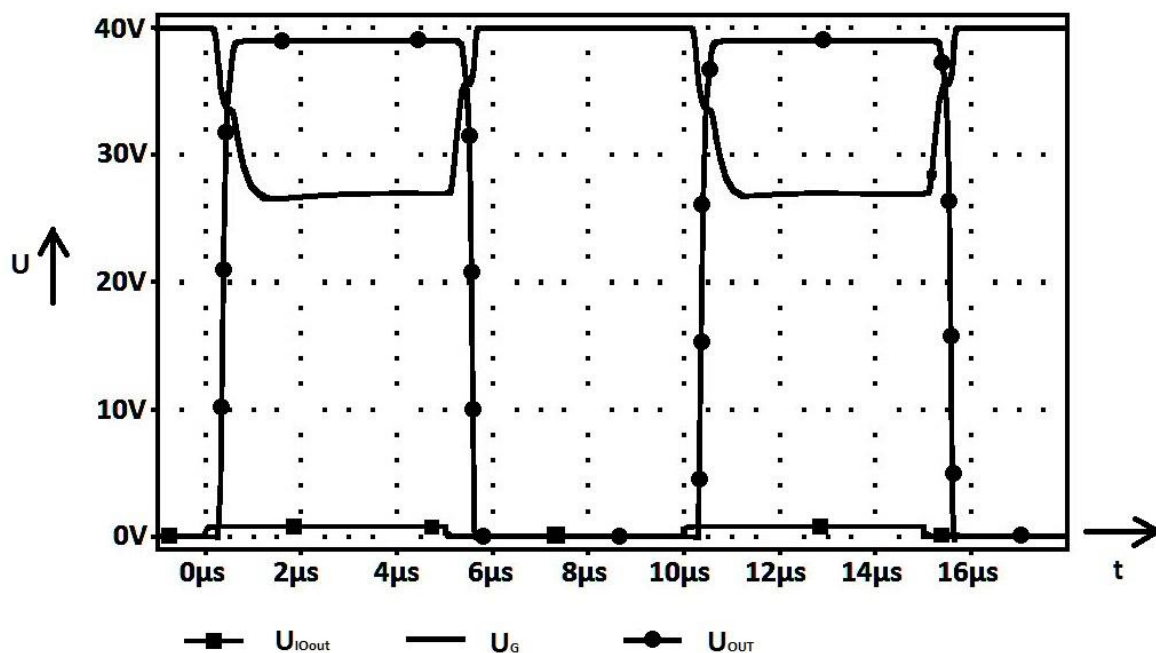
Dále je možné odvodit orientačně minimální výstupní kapacitu [1]

$$C_{OUT} > \frac{I_{out\ p-p} * T_{ONmax}}{U_{out\ p-p}} \Rightarrow C_{OUT} > 41\mu F. \quad (3.9)$$

Z důvodu snížení zvlnění výstupního napětí při použití přijatelné kapacity byla nakonec zvolena paralelní kombinace tří kondenzátorů  $2 \times 47\mu F$  s ESR  $340\ m\Omega$  a  $1 \times$  polypropylenový kondenzátor  $220\ nF$ .

## Návrh spínače.

Z důvodu zvýšení účinnosti byl použit jako výkonový spínač tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem typu P (místo bipolárního tranzistoru). Na buzení byla navržena jednoduchá nábojová pumpa složená ze dvou tranzistorů, která pracuje následovně. Po připojení napájecího napětí a ustálení jsou tranzistory  $Q1$  a  $Q3$  uzavřeny, napětí elektrody GATE tranzistoru je  $U_{GS} = 0V$ . Při sepnutí výstupu IO sepne tranzistor  $Q1$  a tím dojde k odsátí náboje z řídící elektrody tranzistoru ( $U_{GS} = -13V$ ). Po odsátí náboje se opět uzavře tranzistor  $Q1$ . Při následném rozepnutí výstupu IO sepne tranzistor  $Q3$  a tím dojde k opětovnému dodání náboje do řídící elektrody tranzistoru ( $U_{GS} = 0V$ ). Tranzistor  $Q2$  slouží pouze pro napěťovou ochranu výstupu IO. Zapojení spínače bylo simulováno pomocí programu PSpice.



Obr. 15: Průběhy napětí spínače (PSpice)

Na obr. 15 jsou zakresleny důležité průběhy při vstupním napětí 40V proudu 5A a střídě 0,5. Průběh zvýrazněný čtverečky je výstup IO modelovaný podle katalogového listu [4], připojený na vstup spínače. Průběh čarou bez zvýraznění je průběh napětí na řídící elektrodě tranzistoru. Průběh zvýrazněný kolečky je výsledný průběh napětí za tranzistorem na čistě odporové zátěži. Hodnoty součástek byly navrženy tak, aby nedocházelo ke zbytečným proudovým rázům a napěťovým špičkám a zároveň, aby spínání bylo dostatečně rychlé.

#### Volba tranzistoru.

Ze zapojení vyplývá, že tranzistor musí být dimenzován na vstupní napětí a výstupní proud s maximálním zvlněním. Tranzistor byl značně předdimenzován a to z důvodu zvýšení spolehlivosti, přičemž cena takto předdimenzovaného tranzistoru pro malosériovou výrobu je stále velmi příznivá (necelých 20 Kč). Parametry použitého tranzistoru IRFP9140N jsou uvedeny v tabulce 1.

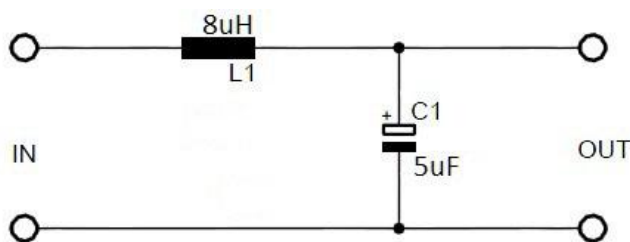
Zkratka	Název	Maximální hodnota
$V_{DSS}$	Napětí drain-source	-100V
$R_{DS(on)}$	Odpor v sepnutém stavu	0,117Ω
$I_D @ TC = 25\text{ }^{\circ}C$	Proud drainem $V_{GS}=10V$	-23A
$I_D @ TC = 100\text{ }^{\circ}C$	Proud drainem $V_{GS}=10V$	-16A
$PD @ TC = 25\text{ }^{\circ}C$	Ztrátový výkon	140W
$V_{GS}$	Napětí gate-source	±20V

Tabulka 1: Parametry tranzistoru IRFP9140N [7]



## Výstupní filtr

Z důvodu dosažení nízkého výstupního zvlnění je na výstupu připojen jednoduchý tzv. tlumivkový filtr (viz. obr. 16).



Obr. 16: Schéma výstupního filtru

Schopnost filtru vyhladit střídavé napětí se nazývá činitel vyhlazení (8)

$$\varphi = \frac{U_{IN}}{U_{OUT}} \quad (3.10)$$

který se spočítá jako poměr vstupní a výstupní střídavé složky napětí. Pro činitel vyhlazení platí při určitém zjednodušení vztah pro danou frekvenci

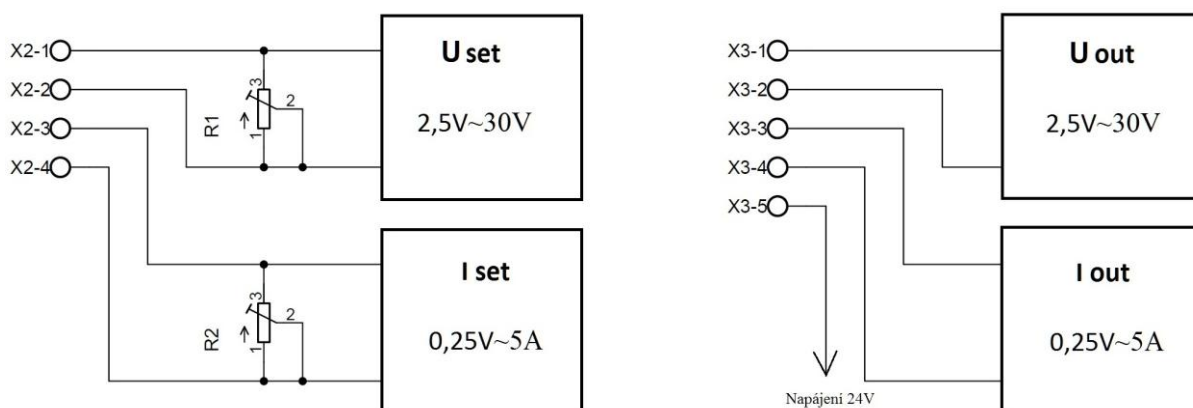
$$\varphi_V = \omega^2 * L_1 * L_2 \quad (3.11)$$

$$\varphi_{100kHz} = (2\pi * 10^5)^2 * 8 * 10^{-6} * 5 * 10^{-6} = 16$$

kde  $\omega$  je úhlový kmitočet. Výpočtem vychází, že zvlnění výstupního napětí na pracovní frekvenci měniče vypočítané ve vztahu (3.3) by se mělo snížit 16 krát na přibližně 12 mVš-š. Tato hodnota výstupního zvlnění je velmi nízká a lze předpokládat, že rušení vzniklé spínáním, bude převyšovat zvlnění.

### 3.3 NÁVRH MĚŘÍCÍ ČÁSTI A NASTAVENÍ

Regulovatelný měnič je připraven pro analogové, nebo i digitální řízení. Na obr. 17 je zakreslen způsob propojení měřicí části s regulovatelným měničem.



Obr. 17: Blokové zapojení měřicí části

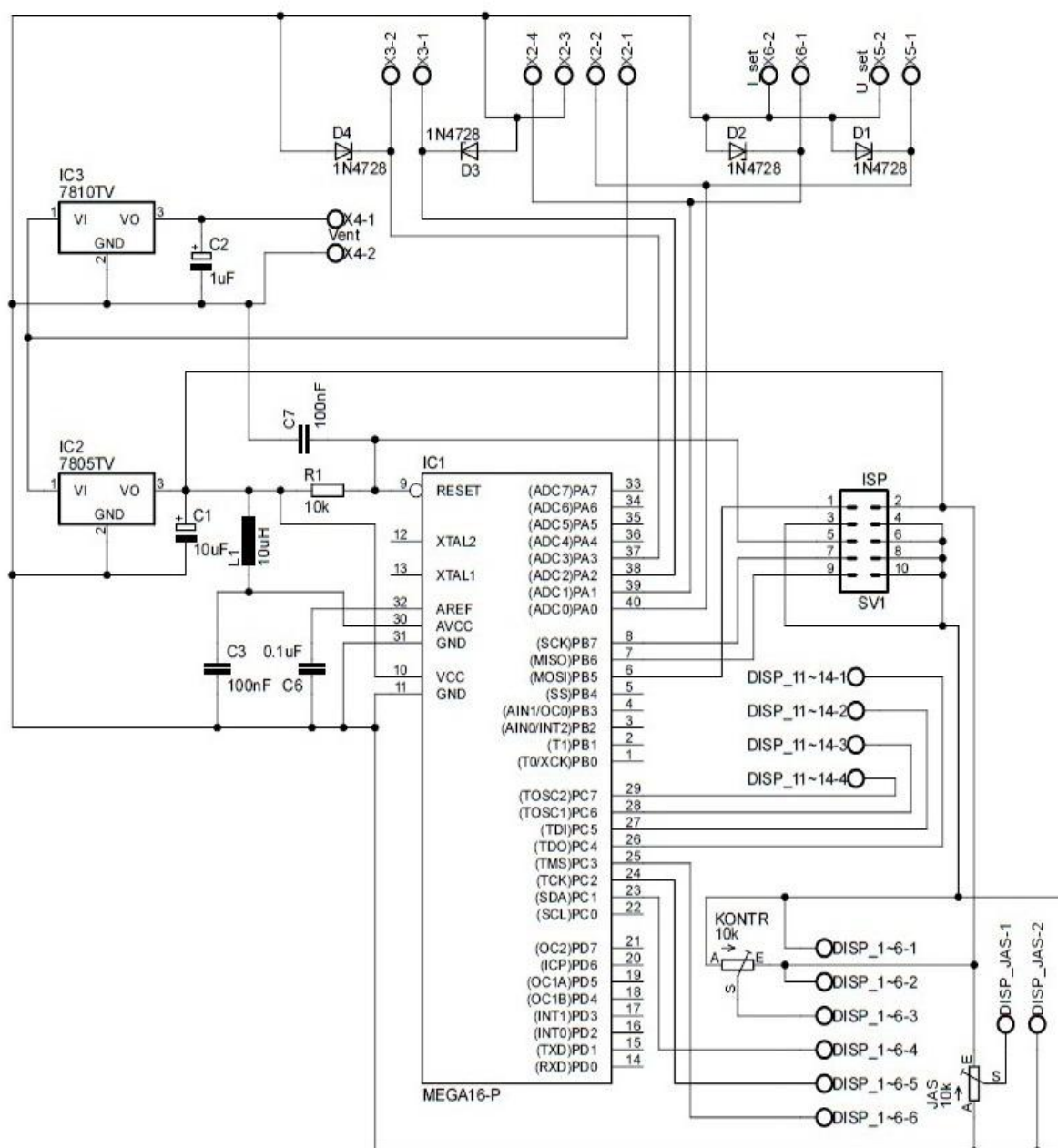
K nastavení velikosti napětí slouží R1 přibližně 5 kΩ a k nastavení velikosti proudu slouží R2 přibližně 500Ω.

Na obr. 18 je uvedeno schéma, které využívá ke své činnosti procesor ATmega16. Tento procesor byl zvolen na základě obeznámení se s ním v předmětu *Mikroprocesorová technika a embedded systémy*, ve kterém byly řešeny úkoly za použití tohoto procesoru. Tento procesor obsahuje celou řadu periférií, toto zapojení však využívá pouze čtyř vstupů interního AD převodníku, výstupní PORT C pro připojení displeje, a programovacího rozhraní ISP. Měřená napětí jsou přivedena přes ochranné diody na vstupy AD převodníku. Převodník má rozlišení 10 bitů a nastavené vnitřní referenční napětí 2,56V. Výstupní hodnota registru převodníku[9]

$$ADCH:L = \frac{V_{in}}{V_{ref}} * (2^{10} - 1) \quad (3.12)$$

je převedena na požadovanou zobrazovanou úroveň napětí nebo proudu pomocí vztahů získaných při návrhu zpětných vazeb regulovatelného měniče ( $2,5V \sim U_{OUT} = 30V$  ;  $0,25V \sim I_{OUT} = 5A$ ). Takto přepočítané hodnoty jsou zobrazeny na displeji se zaokrouhlením na 0,1V a 0,1A.

Nastavení zdroje bylo ponecháno analogové z důvodu intuitivnosti, snadnosti a rychlosti obsluhy. Nastavení je tedy provedeno pomocí odporových děličů s potenciometry, které jsou napájeny referenčním napětím 5V z obvodu TL594.



Obr. 18: Kompletní schéma měřicí části

V horní části schématu (obr. 18) jsou vstupy měřených hodnot, napájení a výstup na ventilátor. Vlevo od procesoru jsou pomocné a napájecí obvody procesoru. Vpravo od procesoru se nachází výstup pro displej a konektor pro programátor ISP. Při návrhu plošného spoje byl kladen důraz na co nejkratší cesty analogových vstupů, a propojení jednotlivých desek pomocí stíněných vodičů.

Program byl vytvořen v programu AVRstudio5 a pro funkci displeje byla použita knihovna, která byla převzata z materiálů k PC cvičením předmětu Mikroprocesorová technika. Celý program je uložen v příloze.

### 3.4 REALIZACE ZDROJE

Jako první byl realizován předregulátor. Pro navinutí sekundárního vinutí transformátoru se nepodařilo sehnat 50  $\mu\text{m}$  tenkou měděnou fólii požadovanou v návrhu. Z důvodu optimálního zaplnění transformátoru bylo sekundární vinutí navinuto paralelně 12-ti vodiči. Po pečlivém osazení byl předregulátor připojen k napájecímu napětí 230V z oddělovacího transformátoru. Po ověření funkčnosti předregulátoru bylo změřeno zvlnění výstupního napětí 1 V $\cdot$ s při výstupním napětí 40V a výstupním proudu 5A. Výstupní napětí bylo změřeno konstantní pro libovolný výstupní proud, a neměnilo se ani při dlouhodobém provozu. Z důvodu zvýšené teploty (přibližně 70 °C) byla paralelní kombinace rezistorů R3, R4 a R5 nahrazena jedním výkonovým rezistorem osazeným s chladičem.

Dále bylo přistoupeno k realizaci regulovatelného měniče. Nejprve byl zhotoven prototyp na desce univerzálního tištěného spoje, a až po ověření funkčnosti zapojení bylo přistoupeno v jeho výrobě. Po pečlivém osazení desky byl regulovatelný měnič připojen prvně na zdroj s proudovým omezením, a až následně byly oba měniče zapojeny za sebe.

Na závěr byla zhotovena deska měřicí části. Zapojení procesoru je velice jednoduché, proto byla odzkoušena až v kompletním zařízení. Jediný problém nastal s inicializací displeje, kde musela být pozměněna knihovna pro jeho ovládání podle katalogového listu výrobce.

Krabice byla zhotovena ze dvou kusů tvaru 'U' které po složení tvoří kvádr. K výrobě byl použit ocelový plech tloušťky 1,5 mm. Krabice váží více než polovinu váhy celého zdroje, ale nabízí spolehlivou ochranu před mechanickým poškozením.

## 4 ZÁVĚR

V rámci této práce byl zhotoven kompletní zdroj a na něm bylo provedeno následující měření. Měření účinnosti při nastaveném vstupním napětí 230V a různých zátěžích. Byla dosažena očekávaná dobrá účinnost převyšující při středním zatížení 70% a při velkém zatížení 80%. Přesné výsledky jsou v příloze. Dále bylo provedeno měření výstupního zvlnění při střídě přibližně 50%. Maximální zvlnění je přibližně 30 mVš-š, což je asi dvojnásobek vypočítaného zvlnění, ale i tak je to velmi dobrý výsledek. Rušení, které při měření přímo na výstupních svorkách dosahuje až 200 mVš-š je způsobeno spínáním tranzistorů. Při malém odebíraném proudu se projevuje rušení způsobené pouze regulovatelným měničem, při vyšších odebíraných proudech se již na výstup dostává rušení z obou měničů. Ve větší vzdálenosti od zdroje je rušení již menší, ale při napájení citlivých zařízení se nesmí vliv rušení, nebo zvlnění výstupního napětí zanedbat. Změřené průběhy jsou uvedeny v příloze. Dále byly kalibrovány údaje indikované na displeji, pro zobrazování přesných hodnot napětí a proudu. Po kalibraci byl zdroj ponechán zatížen po dobu asi 20-ti minut. Zadané a výstupní hodnoty se samovolně pohybovaly v rozmezí 0,1V a 0,1A. Tato nestabilita je způsobena převážně teplotní závislostí použitých součástek. Na závěr byl měřen vliv velikosti výstupního napětí na odebíraném proudu. Největší výkyv byl zjištěn při maximálním výstupním napětí. Nezatížené maximální výstupní napětí je 32,4V a při odebíraném proudu 5A poklesne na 31,4V. Tento pokles napětí je způsoben zpětnou vazbou operačních zesilovačů obvodu TL594. Tento pokles napětí je možné snížit, ovšem za cenu snížení stability zdroje nebo zvýšení doby odezvy na změnu zátěže. Zatěžovací charakteristika je uvedena v příloze.

Náklady na výrobu tohoto zdroje dosáhly přibližně 2000 Kč. Zdroj je srovnatelný s komerčně dostupnými spínanými zdroji s cenou přibližně 3500Kč. Tento zdroj ovšem nabízí oproti prodáváním zdrojům zobrazení i nastavených hodnot. To je výhodné zejména při práci v režimu konstantního proudu, protože uživatel vidí jaké napětí se objeví na výstupních svorkách po odpojení zátěže.

# LITERATURA:

- [1] KREJČIŘÍK, A. *Napájecí zdroje 2*, 2. vydání, BEN – technická literatura, 1997, 352 s. ISBN 80-86056-03-1.
- [2] BROWN, M. *Power supply cookbook*, second edition, Butterworth-Heinemann, 2001, 278 pages, ISBN: 978-0-7506-7329-7.
- [3] Datasheet, *TOPSwitch-GX*, Power Integrations, Inc. 2005, [cit. 6. října 2011]. Dostupné na www: <http://www.powerint.com/sites/default/files/product-docs/top242.250.pdf>.
- [4] Datasheet, *TL594*, Texas Instruments, 2007, [cit. 24. října 2011]. Dostupné na www: <http://www.ti.com/lit/ds/slvs052g/slvs052g.pdf>.
- [5] Datasheet, *ETD cores and accessories*, Ferroxcube, 2008, [cit. 6. října 2010]. Dostupné na www: [http://www.ferroxcube.com/prod/assets/etd\\_frnt.pdf](http://www.ferroxcube.com/prod/assets/etd_frnt.pdf).
- [6] Program, *PIExpert 8*, Power Integrations, Inc. 2010, Po registraci dostupné na www: <http://www.powerint.com/>.
- [7] Datasheet, *IRFP9140N*, International Rectifier, 2009, [cit. 24. října 2011]. Dostupné na www: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfp9140n.pdf>.
- [8] MELEZÍNEK, A. *Napájecí zdroje pro elektronická zařízení*, 2. vydání, SNTL, 1966, 165 stran.
- [9] Datasheet, *ATmega16A*, Atmel Corporation, 2009, [cit. 24. února 2012]. Dostupné na www: <http://www.atmel.com/Images/doc8154.pdf>.
- [10] NOVOTNÝ, V., *Napájení elektronických zařízení*, 1999, FEKT Vysokého učení technického v Brně, skriptum, Dostupné na www: <https://www.vutbr.cz/elearning/>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

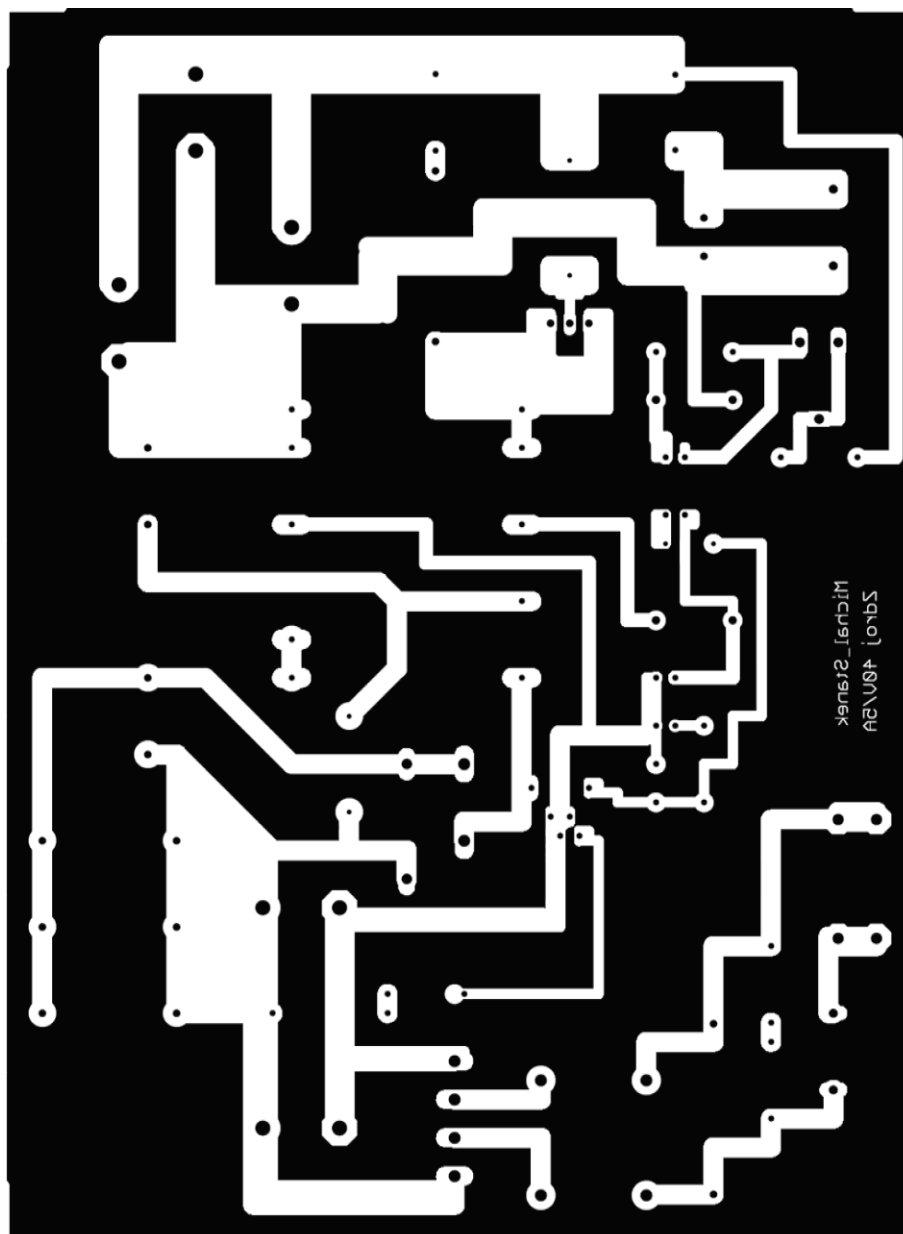
$A_U$	Napětové zesílení
$U_{out\ p-p}$	Špičková hodnota zvlnění výstupního napětí
$I_{out\ p-p}$	Špičková hodnota zvlnění výstupního proudu
$d$	Střída spínání
$d_{max}$	Maximální střída spínání
$f$	Pracovní frekvence měniče
$T_{ON}$	Doba sepnutí
$T_{ON\ max}$	Maximální doba sepnutí
$L$	Induktor
$C$	Kapacitor
$R$	Rezistor
$ESR$	Ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru
$Q$	Tranzistor
$X$	Svorkovnice
$IO$	Integrovaný obvod
$U_{set}$	Nastavené napětí
$I_{set}$	Nastavený proud
$U_{out}$	Výstupní napětí
$I_{out}$	Výstupní proud
$ADCH:L$	Registr obsahující hodnotu AD převodu
$V_{in}$	Vstupní napětí AD převodníku
$V_{ref}$	Referenční napětí AD převodníku

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Deska plošného spoje předregulátoru – bottom (strana spojů)</b>	<b>33</b>
<b>B</b>	<b>Seznam součástek předregulátoru</b>	<b>34</b>
<b>C</b>	<b>Deska plošného spoje regulovatelného měniče – bottom (strana spojů)</b>	<b>35</b>
<b>D</b>	<b>Seznam součástek regulovatelného měniče</b>	<b>36</b>
<b>E</b>	<b>Deska plošného spoje měřicí části – bottom (strana spojů)</b>	<b>37</b>
<b>F</b>	<b>Seznam součástek měřicí části</b>	<b>37</b>
<b>G</b>	<b>Výkresy šasi</b>	<b>38</b>
<b>H</b>	<b>Změřené průběhy výstupního napětí (střídavá složka)</b>	<b>39</b>
<b>I</b>	<b>Tabulka výpočtu účinnosti zdroje a graf</b>	<b>40</b>
<b>J</b>	<b>Zatěžovací charakteristika tabulka a graf</b>	<b>41</b>
<b>K</b>	<b>Program</b>	<b>42</b>
<b>L</b>	<b>Fotografie zdroje a měřicího pracoviště</b>	<b>44</b>



## A Deska plošného spoje předregulátoru – bottom (strana spojů)

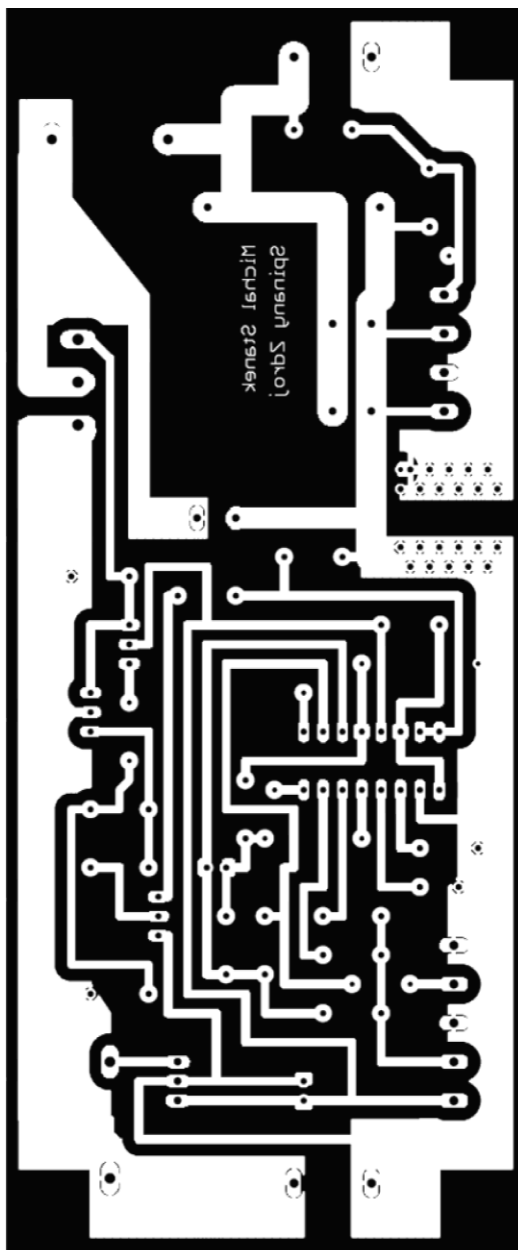


Rozměr desky 164 x 120 [mm], měřítko M1:1

## B Seznam součástek předregulátoru

Označení	Hodnota	Popis
C1	330nF	PP kondenzátor
C2	100 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C2.1	100 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C3	6,2nF	keramický kondenzátor
C4	0,1 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C5	47 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C6	2,2nF	keramický kondenzátor
C7	30pF	keramický kondenzátor
C8	1 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C9	680 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C10	680 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C11	680 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C12	100 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
D1	DSEI8	Rychlá dioda
D2	MUR120	Rychlá dioda
D3	BYW32	Rychlá dioda
D4	BZX85	Referenční dioda
ETD1	ETD39	Transformátor
F1	1,6A	Pojistka
IC1	TOP249Y	Integrovaný spínač
L2	3,3 $\mu$ H	Toroidní cívka
OK1	PC817B	Optočlen
P1	100R	Trimr
R1	1,1M $\Omega$	Rezistor
R2	1,1M $\Omega$	Rezistor
R3	27K $\Omega$	Výkonový rezistor
R4	27K $\Omega$	Výkonový rezistor
R5	27K $\Omega$	Výkonový rezistor
R6	2,4M $\Omega$	Rezistor
R7	2,4M $\Omega$	Rezistor
R8	6,8 $\Omega$	Rezistor
R9	270 $\Omega$	Rezistor
R10	680 $\Omega$	Rezistor
R11	1k $\Omega$	Rezistor
RB1	8A	Usměrňovací můstek
U\$1	6mH	Filtr
VR1	P6KE200	Transil

### C Deska plošného spoje regulovatelného měniče – bottom (strana spojů)

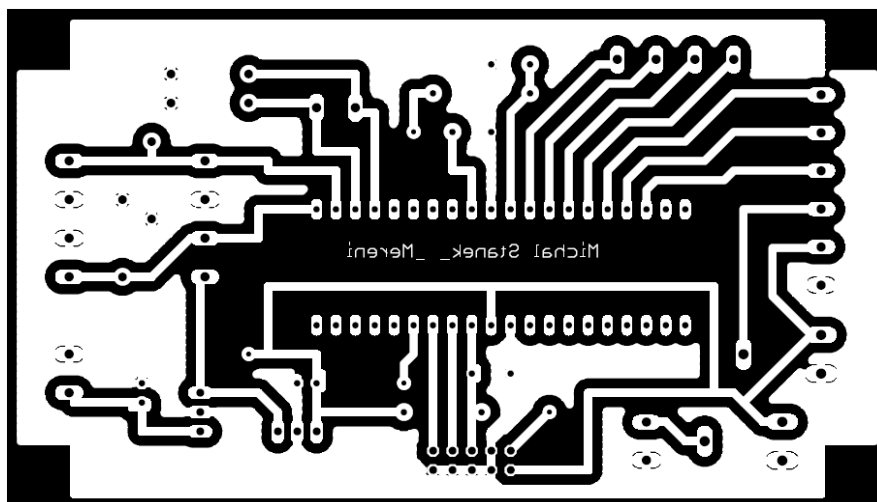


Rozměr desky 164 x 69 [mm], měřítko M1:1

## D Seznam součástek regulovatelného měniče

Označení	Hodnota	Popis
C1	1 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C2	1 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C3	1nF	keramický kondenzátor
C4	47 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C5	47 $\mu$ F	Elektrolytický kondenzátor
C6	220nF	PP kondenzátor
D1	BYW29	Rychlá dioda
IC1	TL594CN	PWM regulátor
IC2	7824	Stabilizátor 24V
L1	100uH	Tlumivka
MOSFET	IRFP9140N	Tranzistor MOSFET
Q1	BC638	Tranzistor
Q2	BC639	Tranzistor
Q3	BC639	Tranzistor
R1	1k $\Omega$	Rezistor
R2	100k $\Omega$	Rezistor
R3	8,2k $\Omega$	Rezistor
R4	8,2K $\Omega$	Rezistor
R5	100k $\Omega$	Rezistor
R6	470R	Rezistor
R7	10k $\Omega$	Rezistor
R8	4,8K $\Omega$	Rezistor
R9	220R	Rezistor
R10	470R	Rezistor
R11	6k $\Omega$	Rezistor
R12	1k $\Omega$	Rezistor
R13	11k $\Omega$	Rezistor
R15	10k $\Omega$	Rezistor
R16	11*0,5 $\Omega$	Bočník 45m $\Omega$
R17	5,6k $\Omega$	Rezistor
R18	510R	Rezistor
ZD1	1N5347B	Referenční dioda
POT1	5,1k $\Omega$	Externí potenciometr
POT2	470R	Externí potenciometr

## E Deska plošného spoje měřicí části – bottom (strana spojů)

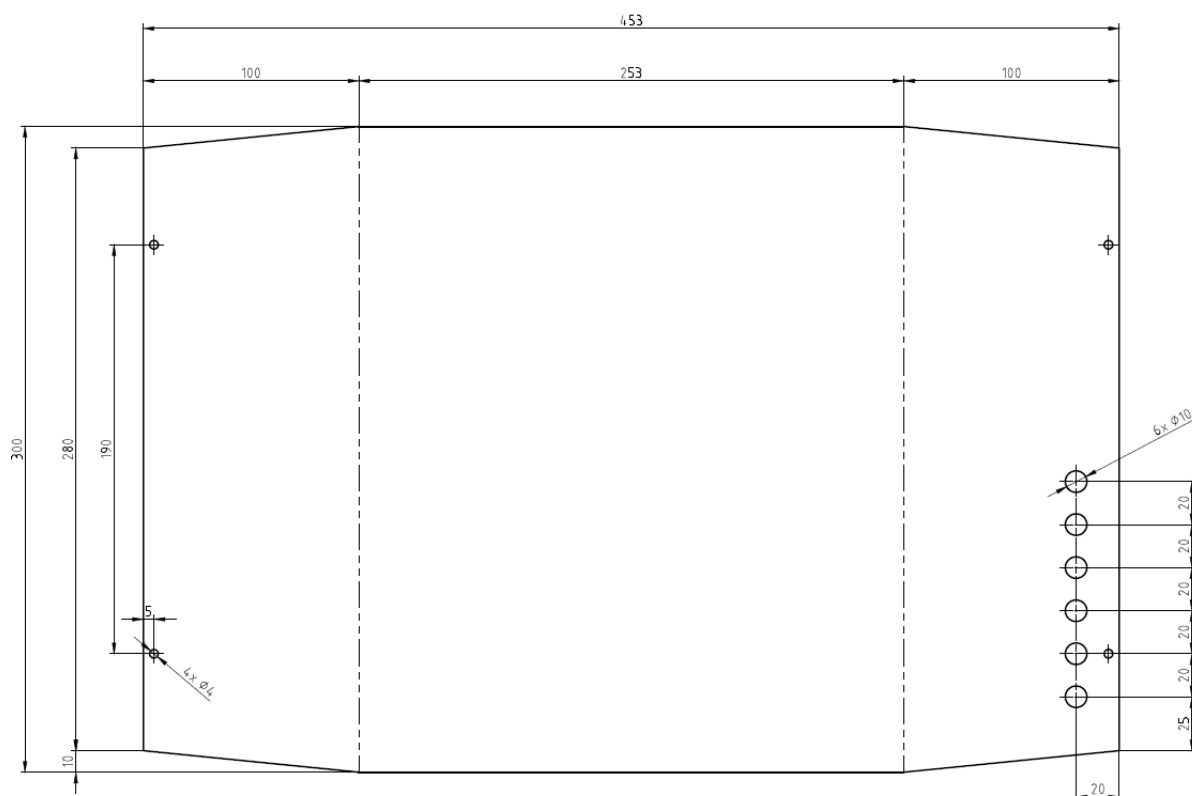


Rozměr desky 114 x 66 [mm], měřítko M1:1

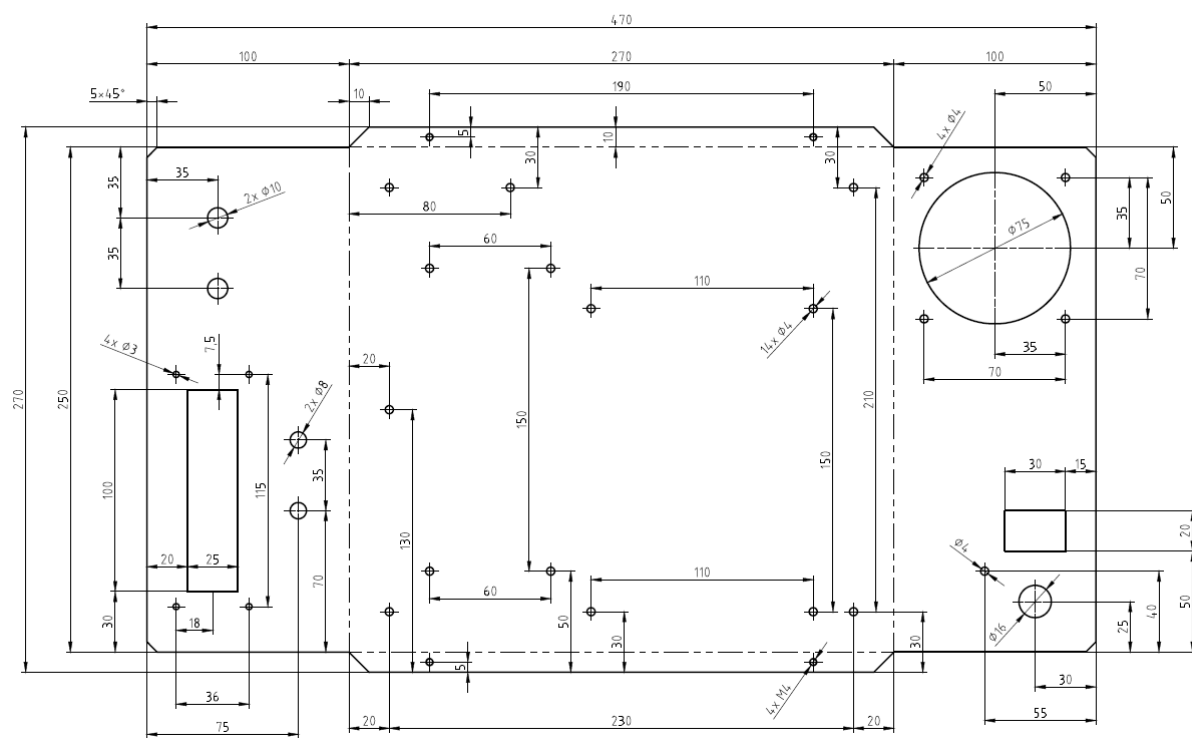
## F Seznam součástek měřicí části

Označení	Hodnota	Popis
C1	10uF	Elektrolytický kondenzátor
C2	1μF	Elektrolytický kondenzátor
C3	100nF	keramický kondenzátor
C6	0,1μF	keramický kondenzátor
C7	100nF	keramický kondenzátor
D1	1N4728	Zenerova dioda
D2	1N4728	Zenerova dioda
D3	1N4728	Zenerova dioda
D4	1N4728	Zenerova dioda
IC1	ATmega16	Mikroprocesor
IC2	7805	Stabilizátor 5V
IC3	7810	Stabilizátor 10V
JAS	10kΩ	Trimr
KONTR	10kΩ	Trimr
L1	10uH	Tlumivka
R1	10kΩ	Rezistor
SV1		Hřebínkový konektor ISP

## G Výkresy šasi

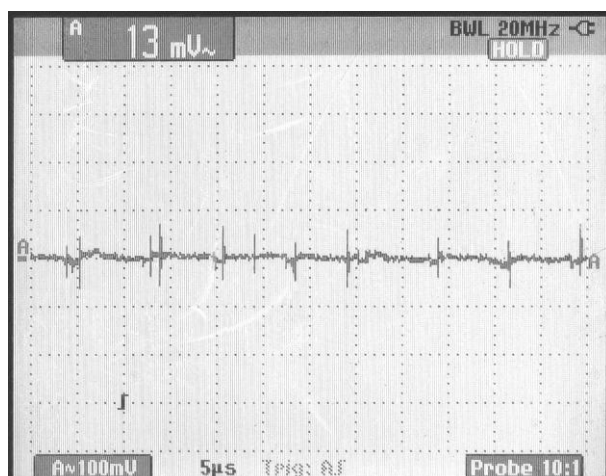


Horní díl krabice měřítko M1:3,5

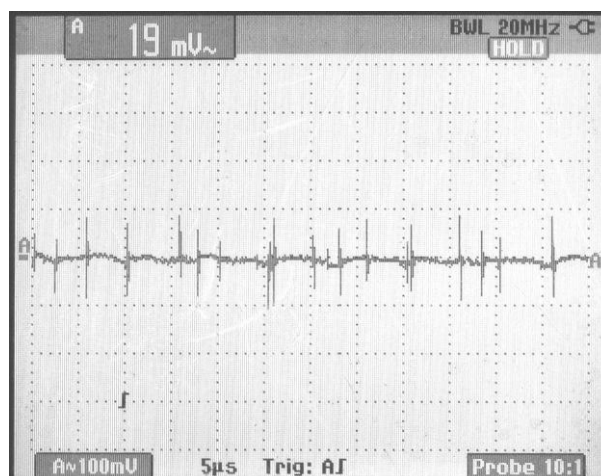


Spodní díl krabice měřítko M1:3,75

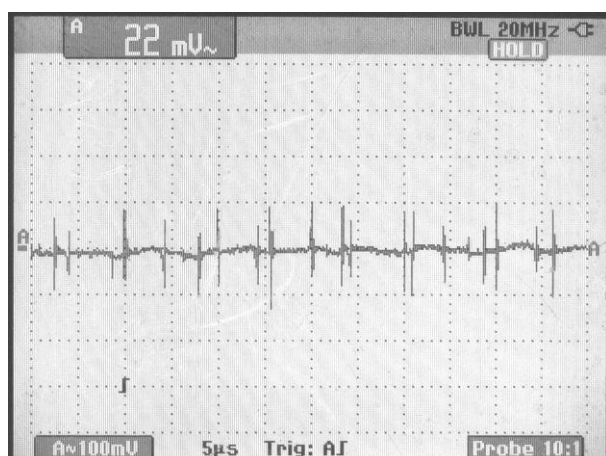
## H Změřené průběhy výstupního napětí (střídavá složka)



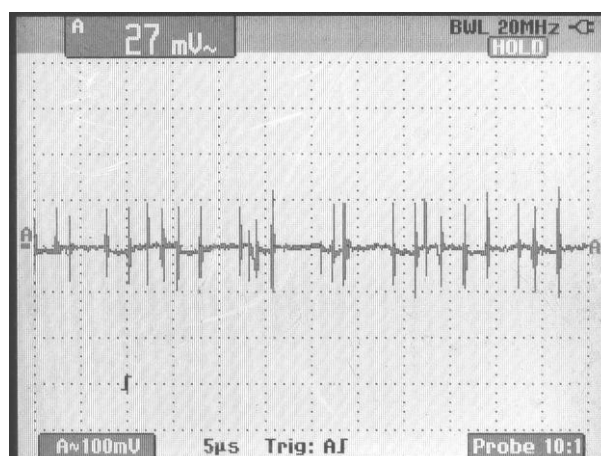
Výstupní proud 1A



Výstupní proud 2A



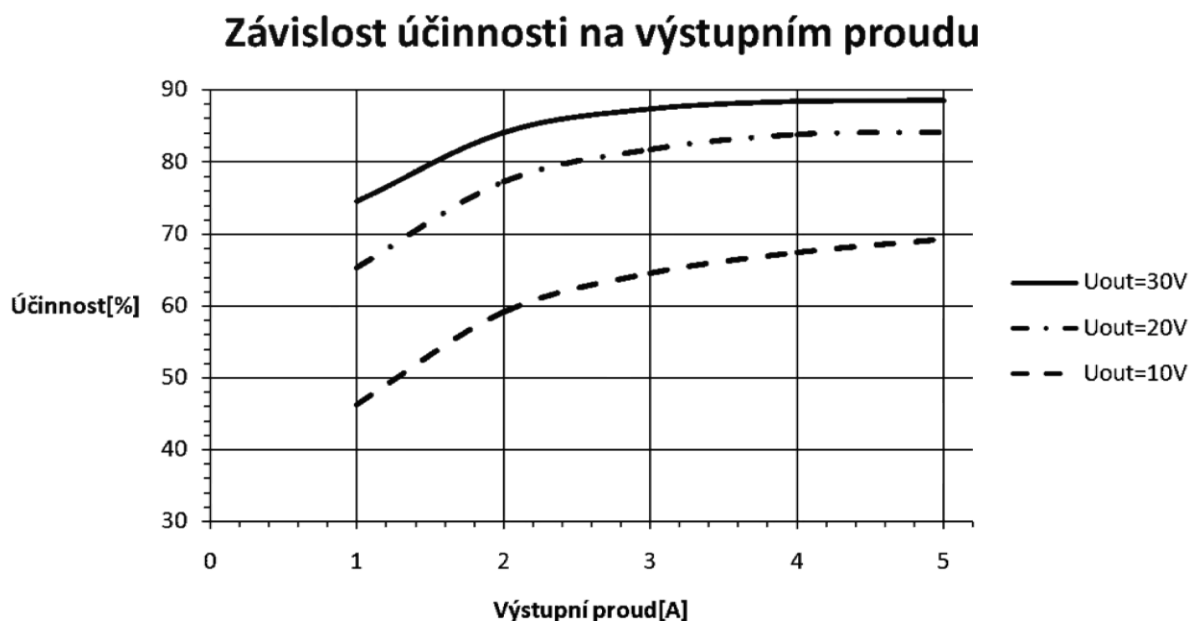
Výstupní proud 3,5A



Výstupní proud 5A

## I Tabulka výpočtu účinnosti zdroje a graf

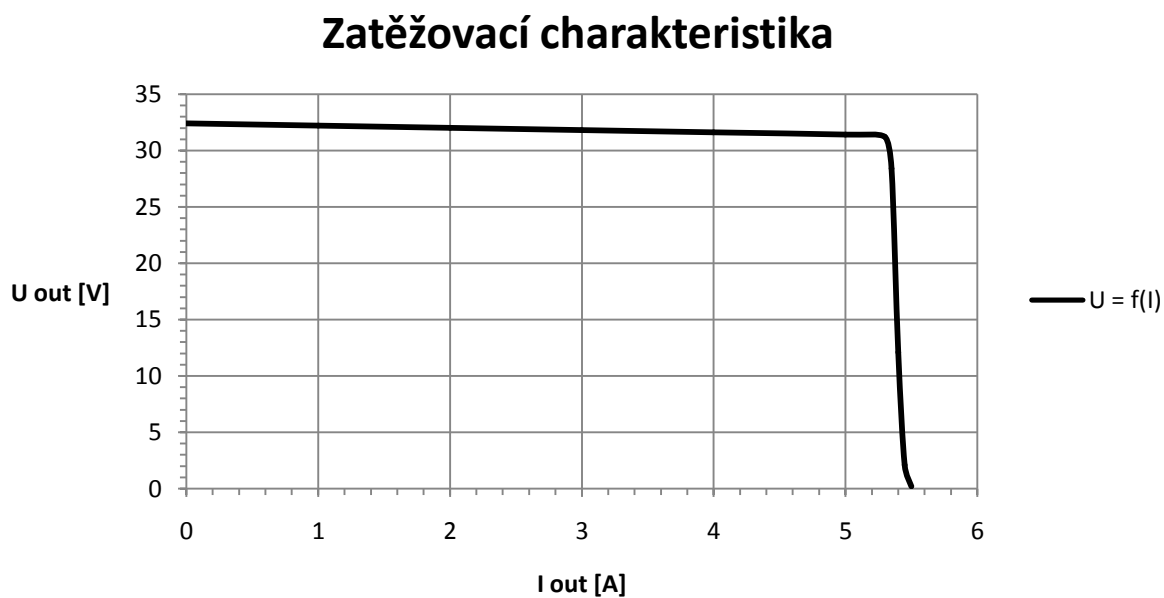
Výstupní hodnoty			Vstupní hodnoty			Účinnost
Napětí	Proud	Výkon	Napětí	Proud	Příkon	[%]
10V	1A	10W	230V	94mA	21,6	46,2
10V	2A	20W	230V	147mA	33,8	59,2
10V	3A	30W	230V	202mA	46,5	64,6
10V	4A	40W	230V	258mA	59,3	67,4
10V	5A	50W	230V	314mA	72,2	69,2
20V	1A	20W	230V	133mA	30,6	65,4
20V	2A	40W	230V	225mA	51,7	77,3
20V	3A	60W	230V	319mA	73,4	81,8
20V	4A	80W	230V	415mA	95,4	83,8
20V	5A	100W	230V	517mA	118,9	84,1
30V	1A	30W	230V	175mA	40,3	74,5
30V	2A	60W	230V	310mA	71,3	84,2
30V	3A	90W	230V	448mA	103,1	87,3
30V	4A	120W	230V	590mA	135,7	88,4
30V	5A	150W	230V	736mA	169,3	88,6





## J Zatěžovací charakteristika tabulka a graf

Výstupní proud [A]	Výstupní napětí [V]
0,00	32,4
1,00	32,2
2,00	32,0
3,00	31,8
4,00	31,6
5,00	31,4
5,30	31,2
5,35	28,4
5,40	12,1
5,45	2,1
5,50	0,2



Zatěžovací charakteristika při nastavených maximálních hodnotách napětí a proudu ( $U_{set} = 32,4\text{V}$  ,  $I_{set} = 5,4\text{A}$ ).

## K Program

```
/*
 * Spinany_Zdroj.c
 *
 *
 * Author: Michal Stanek
 */
#include <avr/io.h>           //hlavickovy soubor mikrokontroleru
#include <stdio.h>            //hlavičkový soubor input/output
#define F_CPU 1000000UL      //rychlost oscilatoru procesoru pro knihovnu dealy.h
#include <util/delay.h>       //hlavickovy soubor zpozdeni
#include <avr/interrupt.h>    //hlavickovy soubor preruseni
#include "lcd_h.h"           //hlavickovy soubor LCD
int tisk(void);
int cekej(int);              //deklarace funkcí
                               /* Globální proměnné */
char chanel = 0;             //zvoleny kanal ADC
char j=0;                    //Pomocna promenna pro cyklus
float Uset = 0;              //Nastavene napeti
float Iset = 0;              //Nastaveny proud
float Uout = 0;              //Vystupni napeti
float Iout = 0;              //Vystupni proud
char buffer [16];            //Globální proměná znaky výpisu
int main(void){
    cekej(10);
    lcd_init();               //Inicializuje display
    lcd_clrscr();             //Vymaze display

    /* Uvitaci text */
    lcd_gotoxy(1,0);          //Výchozí poloha zápisu
    sprintf ( buffer , "Michal Stanek" ); //Naplneni promenne buffer
    lcd_puts ( buffer );      //Pošle řetězec na display
    lcd_gotoxy( 1 , 1 );      //Dalsi radek
    sprintf ( buffer , "SPINANY ZDROJ" ); //Naplneni promenne buffer
    lcd_puts ( buffer );      //Pošle řetězec na display
    cekej (10);               //Zpozdeni 2s
    lcd_clrscr();             //Vymaže display

    ADMUX |= (1<<REFS1) | (1<<REFS0);
                               //Vyber vnitřní reference 2.56V, kanal PA0
    ADCSRA |= (1<<ADEN) | (1<<ADIE) | (1<<ADPS1) | (1<<ADPS0);
                               //Zapnutí ADC, povolení preruseni, delicka 8*
    ADCSRA |= (1<<ADSC);       //Zahajeni prevodu
    sei();                     //Povoleni vseh preruseni
    while(1);                 //Nekonecna smycka
    return(1);
}

ISR(ADC_vect){                //Obsluha preruseni ADC
    volatile unsigned int prevod = ADCW;
                               //Hodnota z převodníku do pomocné proměnné
    switch (chanel){
        case 0:                //Kanal PA0
            Uset += (float) prevod; //Hodnota prevodu do Uset
            ADMUX = (ADMUX & 0xfc) | (0<<MUX1) | (1<<MUX0);
                               //Zmena kanalu na PA1
            chanel = 1;
            break;
        case 1:                //Kanal PA1
            Iset += (float)prevod; //Hodnota prevodu do Iset
            ADMUX = (ADMUX & 0xfc) | (1<<MUX1) | (0<<MUX0);
                               //Zmena kanalu na PA2
            chanel = 2;
            break;
        case 2:                //Kanal PA2
            Uout += (float)prevod; //Hodnota prevodu do Uout
```

```

        ADMUX = (ADMUX & 0xfc) | (1<<MUX1) | (1<<MUX0);
        //Zmena kanalu na PA3
        chanel = 3;
        break;
    case 3:        //Kanal PA3
        Iout += (float)prevod;        //Hodnota prevodu do Iout
        ADMUX = (ADMUX & 0xfc) | (0<<MUX1) | (0<<MUX0);
        //Zmena kanalu na PA0
        chanel = 0;

        j++;
        _delay_ms(10);
        if (j>7){        //Když počet načtení všech kánálů>7
            j=0;
            Uset /= 8; Iset /= 8; Uout /= 8; Iout /= 8;
            //Vytvoření průměru z 8 hodnot
            tisk();        //Volání fce tisku na display
            Uset = 0; Iset = 0; Uout = 0; Iout = 0;
        }
    }

    ADCSRA |= (1<<ADEN) | (1<<ADSC) ;
    //Zapnutí převodníku, zahájení nového prevodu
}

/* Fce pro prepocet hodnot z převodníku a zobrazení na display */
int tisk(void){
    double U_set=((double) Uset) * 0.03311258 ;
    //Prepocet hodnot z převodníku na skutečné hodnoty
    double I_set((((double) Iset) * 0.03920354) + 0.57 ;
    double U_out=((double) Uout) * 0.03293478 ;
    double I_out=((double) Iout) * 0.04347826;

    sprintf ( buffer , " %4.1f V %4.1f V ", U_set , U_out) ;
    //Naplnění proměnné buffer
    lcd_firstline();        //Výchozí poloha zápisu
    lcd_puts ( buffer );        //Pošle řetězec na display
    lcd_secondline();        //Další řádek
    sprintf ( buffer , " %4.1f I %4.1f I ", I_set , I_out) ;
    //Naplnění proměnné buffer
    lcd_puts ( buffer );        //Pošle řetězec na display
    return ( 1 );
}

/*Fce pro velký delay*/
/*delay= pocet*200ms*/
int cekej(int pocet){
    char i=0;
    for (i=0 ; i<pocet ; i++) //Cyklus se opakuje pocet-krát
        _delay_ms(200);        //Zpoždění 200 ms
    return ( 1 );
}

```

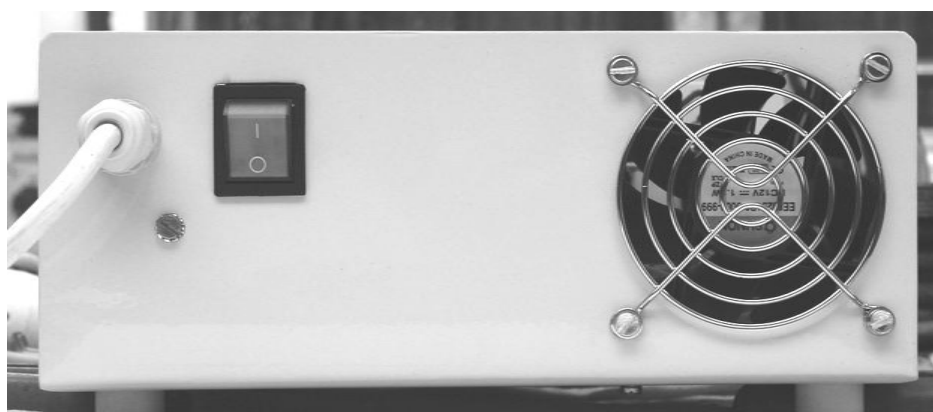
## L Fotografie zdroje a měřícího pracoviště



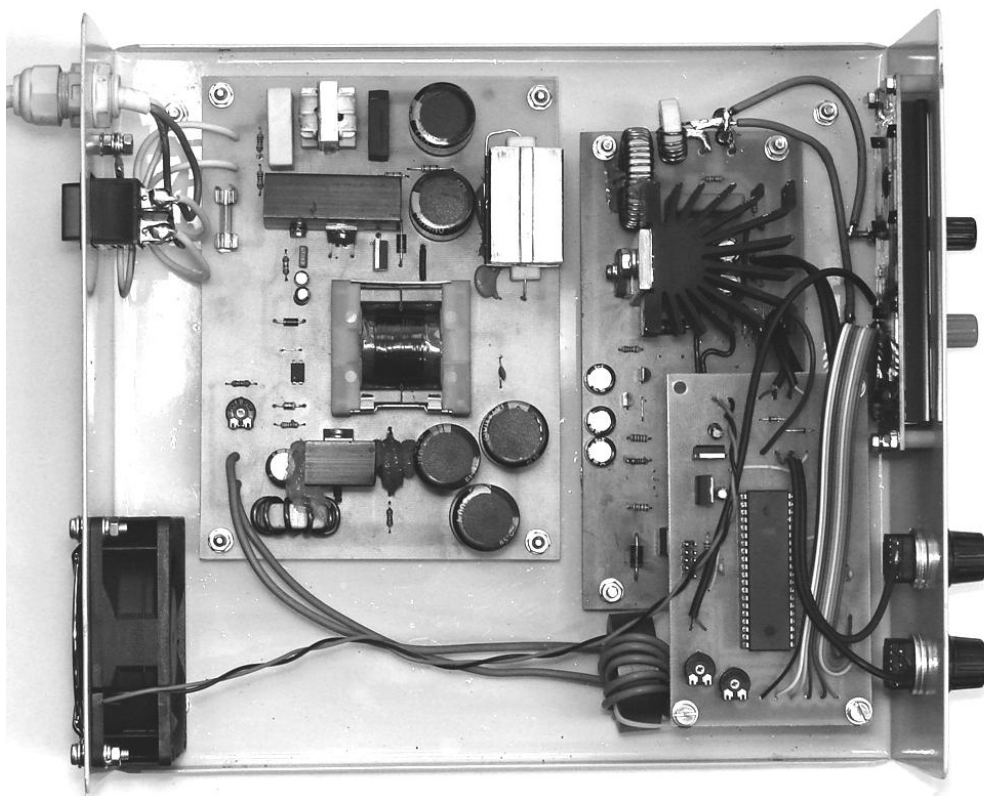
Zdroj pohled zepředu uvítací obrazovka



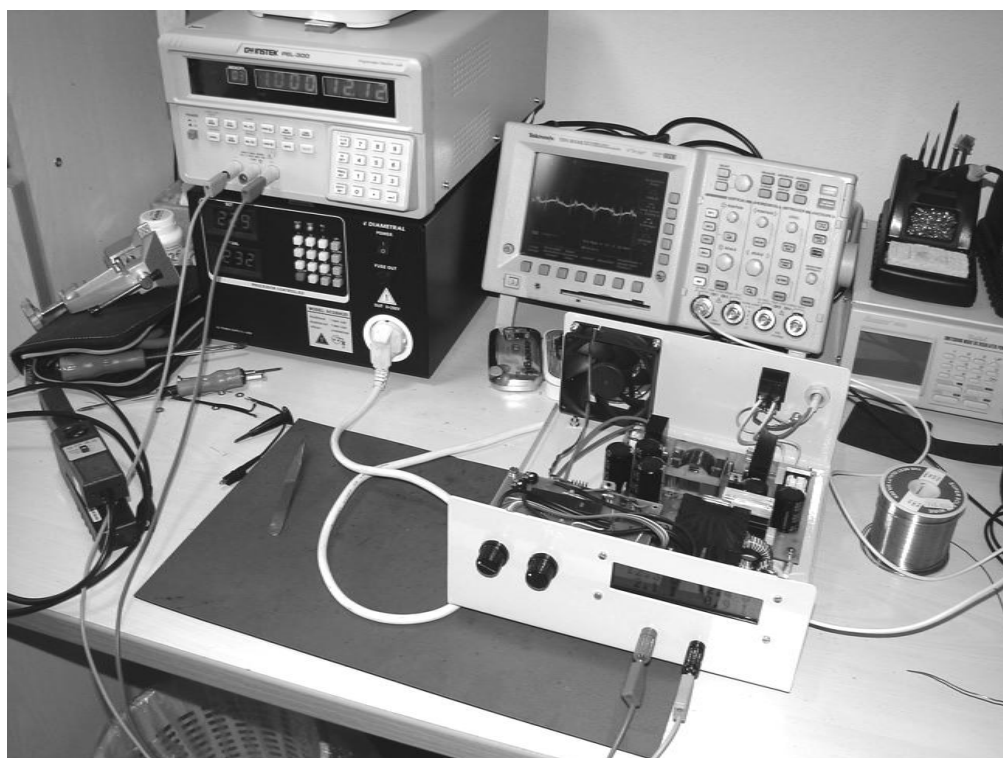
Zdroj pohled zepředu provozní stav



Zdroj pohled zezadu



Zdroj pohled shora



Měřicí pracoviště